

УДК 617-089.5

[https://doi.org/10.31612/2616-4868.2\(12\).2020.05](https://doi.org/10.31612/2616-4868.2(12).2020.05)

СУЧАСНІ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НЕПРЯМОЇ КАЛОРИМЕТРІЇ У ПЕРИОПЕРАЦІЙНОМУ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ

В. І. Черній, А. І. Денисенко

Державна наукова установа «Науково-практичний центр профілактичної та клінічної медицини» Державного управління справами, Київ, Україна

Резюме

Мета дослідження. Розробити спосіб періопераційного енергомоніторингу та впровадити його в клінічну практику.

Матеріал і методи. Для дослідження були залучені 125 пацієнтів, яким проводилися різні оперативні втручання під загальним знеболюванням з використанням інгаляційного анестетика севофлюрану та наркотичного анальгетика фентанілу в умовах низько-поточної штучної вентиляції легень. Методи періопераційного моніторингу «Міжнародні стандарти безпечної анестезіологічної практики» WFSA (World Federation Of Societies of Anaesthesiologists, 2010) були доповнені використанням непрямой калориметрії.

Результати. Проаналізувавши літературні дані, було виявлено тісний кореляційний зв'язок між енергетичним еквівалентом кисню (EEO_2) та респіраторним коефіцієнтом (RQ). Автори отримали відповідну формулу однофакторної лінійної регресії, яка мала вигляд: $\text{EEO}_2 = 1,157 \times \text{RQ} + 4,037$. Використовуючи основні принципи газообміну в легенях Бора-Енгофа, був розроблений метод періопераційного енергомоніторингу, на основі непрямой калориметрії з урахуванням реальних значень енергетичного еквівалента кисню пацієнтів. Розроблена універсальна формула визначення рівня метаболізму хворого (MR, кал/хв) у вигляді: $\text{MR} = [0,863 \times V_E \times (P_E \text{CO}_2 / P_a \text{CO}_2) \times (\text{FiO}_2 - \text{FeO}_2)] \times (1,157 \times \text{RQ} + 4,037)$

де, V_E – загальна вентиляція легень за хвилину (мл/хв), $P_E \text{CO}_2$, $P_a \text{CO}_2$ – парціальний тиск відповідно в суміші газів, яка видихається та в артеріальній крові (мм рт.ст.). FiO_2 та FeO_2 – фракція кисню в газовій суміші, яка вдихається та видихається в одиницях (%/100). Метод реалізований у вигляді комп'ютерної програми, створеної на основі розробленої формули. В роботі представлені методи інтенсивної періопераційної терапії з урахуванням рівня метаболізму.

Висновок. Метод періопераційного енергомоніторингу істотно доповнює «Міжнародні стандарти безпечної анестезіологічної практики», WFSA (2010), підвищує періопераційну безпеку пацієнтів за рахунок виявлення порушень метаболізму та проведення відповідної патогенетичної корекції.

Ключові слова: періопераційний енергомоніторинг, споживання кисню, енергетичний (калорійний) еквівалент кисню, рівень метаболізму.

ВСТУП

В світі сучасних хірургічних технологій, особливо Fast Track-хірургії, які стали більш малоінвазивними та кровозберігаючими, все більшу роль відіграють анестезіологічні засоби їх періопераційного забезпечення [1-2]. І в цьому сенсі якісний періопераційний моніторинг набуває особливої ваги. Так, наразі, в операційних використовують «Міжнародні стандарти

безпечної анестезіологічної практики» WFSA (World Federation Of Societies of Anaesthesiologists), (2010), які включають в себе: моніторинг оксигенації, дихальних шляхів, вентиляції, гемодинаміки, температури, нервово-м'язової провідності, глибини наркозу та динаміки пробудження [3]. При всій їх надійності, вони не охоплюють контроль процесів метаболізму, що особливо важливо в умовах проведення загальної інгаляційної низько поточної (Low Flow Anesthesia, LFA)

та мало поточної анестезії (Minimal Flow Anesthesia, MFA), а тому не можуть повною мірою запобігати ризикам післяопераційних ускладнень, пов'язаних з їх порушеннями.

Мета дослідження — розробити спосіб періопераційного енергомоніторингу та впровадити його в клінічну практику.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Враховуючи можливості моніторів сучасного наркозно-дихального обладнання операційних, які дозволяють в режимі реального часу визначати об'єми та газовий склад суміші, яку пацієнт вдихає та видихає, самим зручним способом енергомоніторингу є непряма (респіраторна) калориметрія, яка ґрунтується на даних газового аналізу. Визначивши, споживання кисню (Oxygen uptake, VO_2 , мл/хв) та знаючи реальний енергетичний (калорійний) еквівалент кисню (Energy Equivalent of Oxygen, EEO_2) (кал/л), тобто, ту кількість енергії, яка звільняється при повному окисленні певної речовини до вуглекислого газу і води, на кожен мл поглиненого при цьому кисню, можливо визначити рівень метаболізму (Metabolic Rate, MR) (кал) пацієнта та контролювати його періопераційно.

$$\text{Тобто: } MR = VO_2 \times EEO_2 \quad (1)$$

Враховуючи, що для здійснення газообміну важливим є не весь об'єм газової суміші, яка вентилює легені, а тільки та його частина, яка вентилює альвеолярний простір (Valv), де безпосередньо здійснюється газообмін, рівень споживання кисню можна визначити наступним чином:

$$VO_2 = \text{Valv} \times (FiO_2 - FeO_2), \quad (2)$$

де: FiO_2 — фракція кисню в суміші, яка вдихається;
 FeO_2 — фракція кисню в кінцевій частині суміші, яка видихається;

Valv — альвеолярна вентиляція (мл/хв).

Розуміючи, що в анатомічному та альвеолярному мертвому просторі газообмін не відбувається, та, враховуючи, що вуглекислий газ (CO_2), який видихається, поступає із альвеолярного газу, а не з газу мертвого простору, кількість його виділення можна представити так:

$$V_E \times F_E CO_2 = \text{Valv} \times F_A CO_2, \quad (3)$$

де: $F_E CO_2$ і $F_A CO_2$ — відповідно фракції CO_2 в газі, який видихається та альвеолярному газі.

Оскільки, загальна вентиляція легень складається з альвеолярної вентиляції легень та вентиляції мертвого простору (VD), зрозуміло, що альвеолярна вентиляція дорівнює:

$$V_E - VD \quad (4)$$

Враховуючи формулу (4), після підстановки « $V_E - VD$ » замість «Valv» в формулу (3) та нескладного обчислення отримуємо:

$$V_E \times F_E CO_2 = (V_E - VD) \times F_A CO_2$$

$$V_E \times F_E CO_2 = V_E \times F_A CO_2 - VD \times F_A CO_2$$

$$(V_E \times F_A CO_2) - (V_E \times F_E CO_2) = VD \times F_A CO_2$$

$$V_E \times (F_A CO_2 - F_E CO_2) = VD \times F_A CO_2 \quad (5)$$

Формулу (5) легко представити у вигляді формули-пропорції:

$$VD/V_E = (F_A CO_2 - F_E CO_2) / F_A CO_2 \quad (6)$$

Вважаючи, що парціальний тиск пропорційний його складу, її можливо записати у вигляді:

$$VD/V_E = (P_A CO_2 - P_E CO_2) / P_A CO_2 \quad (7)$$

Це і є формула Бора-Енгоффа (Bohr-Enghoff's equation) [4].

де: VD/V_E — об'ємна частина вентиляції мертвого простору від загальної вентиляції легень,
 $P_A CO_2 - P_E CO_2$ — парціальний тиск CO_2 в альвеолах легень та в кінці видиху.

Оскільки, у людей без порушень вентиляції та легеневої перфузії парціальний тиск CO_2 в альвеолярному газі та артеріальній крові практично однакові, формула Бора-Енгоффа може бути записана у вигляді:

$$VD/V_E = (PaCO_2 - P_E CO_2) / PaCO_2 \quad (8)$$

Виходячи з формули (8), альвеолярну вентиляцію легень можна представити у вигляді:

$$\text{Valv} = V_E \times [1 - (VD/V_E)] = V_E \times [1 - (PaCO_2 - P_E CO_2) / PaCO_2] \quad (9)$$

де: $1 - (VD/V_E)$ — об'ємна частина альвеолярної від загальної вентиляції легень;

Після нескладного обчислення отримаємо:

$$\text{Valv} = V_E \times (P_E CO_2 / PaCO_2) \quad (10)$$

Тоді, з урахуванням коефіцієнта перетворення значень із системи STPD до системи BTPS, формула (10) буде виглядати так:

$$\text{Valv} = K \times V_E \times (P_E CO_2 / PaCO_2), \quad (11)$$

де: K — коефіцієнт перетворення значень із системи STPD до системи BTPS. Зазвичай, його приймають рівним 0,863 (Jeret N. et al., 1971).

А споживання кисню, згідно формули (2) буде:

$$VO_2 = 0,863 \times V_E \times (P_E CO_2 / PaCO_2) \times (FiO_2 - FeO_2) \quad (12)$$

Тоді, формулу (1) визначення рівня метаболізму можна представити у вигляді:

$$MR = [0,863 \times V_E \times (P_E CO_2 / PaCO_2) \times (FiO_2 - FeO_2)] \times EEO_2 \quad (13)$$

Для визначення енергетичного еквівалента кисню формули нашої моделі енергомоніторингу, проведено вивчення відповідної літератури. При цьому, Luck (1924) встановлено, що поглинання певної кількості кисню і виділення певної кількості вуглекислого газу за один і той же проміжок часу, супроводжується відповідною кількістю виділеної енергії [5]. По їх співвідношенню можна судити про те, які речовини переважно окислюються. Співвідношення між кількістю вуглекислого газу, що виділився в процесі окислення, і кількістю кисню, який пішов на окислення (VCO_2/VO_2), називається респіраторним коефіцієнтом (Respiratory

Quotient, RQ), який умовно можна розглядати як коефіцієнт корисної дії «енергетичної машини» тканини пацієнта. Величина RQ різна при окисленні білків (0,8), вуглеводів (1,0) та жирів (0,7). При змішаному харчуванні RQ коливається в межах 0,85–0,90.

На теперішній час, таблиця Luck втратила свою практичну складову в силу наявності багатьох неточностей та помилок в розрахунках. Наразі використовується більш надійний спосіб обчислення непротеїнових дихальних коефіцієнтів, який відповідає прийнятим в даний час біохімічним та фізичним даним (табл. 1) [6].

Таблиця 1

Таблиця не протеїнових респіраторних коефіцієнтів (F. Peronnet et D. Massicotte)

RQ	Percentages of energy from		Energy equivalent of oxygen		RQ	Percentages of energy from		Energy equivalent of oxygen	
	Glucose	Fatty acids	kcal/l (STPD)	kJ/l (STPD)		Glucose	Fatty acids	kcal/l (STPD)	kJ/l (STPD)
0.7036	0	100	4.851	20.287	0.855	53.4	46.6	5.026	21.019
0.705	0.5	99.5	4.852	20.291	0.86	55.1	44.9	5.032	21.044
0.71	2.3	97.7	4.858	20.316	0.865	56.8	43.2	5.037	21.065
0.715	4.2	95.8	4.864	20.341	0.87	58.5	41.5	5.043	21.090
0.72	6.0	94.0	4.870	20.366	0.875	60.2	39.8	5.049	21.115
0.725	7.8	92.2	4.875	20.387	0.88	61.9	38.1	5.055	21.140
0.73	9.6	90.4	4.881	20.412	0.885	63.6	36.4	5.060	21.161
0.735	11.4	88.6	4.887	20.437	0.89	65.3	34.7	5.066	21.186
0.74	13.2	86.8	4.893	20.463	0.895	66.9	33.1	5.072	21.211
0.745	15.0	85.0	4.899	20.488	0.9	68.6	31.4	5.078	21.236
0.75	16.8	83.2	4.904	20.509	0.905	70.3	29.7	5.084	21.261
0.755	18.6	81.4	4.910	20.534	0.91	71.9	28.1	5.089	21.282
0.76	20.4	79.6	4.916	20.559	0.915	73.6	26.4	5.095	21.307
0.765	22.1	77.9	4.922	20.584	0.92	75.3	24.7	5.101	21.332
0.77	23.9	76.1	4.927	20.605	0.925	76.9	23.1	5.107	21.357
0.775	25.7	74.3	4.933	20.630	0.93	78.6	21.4	5.112	21.378
0.78	27.4	72.6	4.939	20.655	0.935	80.2	19.8	5.118	21.403
0.785	29.2	70.8	4.945	20.680	0.94	81.8	18.2	5.124	21.429
0.79	31.0	69.0	4.951	20.705	0.945	83.5	16.5	5.130	21.454
0.795	32.7	67.3	4.956	20.726	0.95	85.1	14.9	5.136	21.479
0.8	34.5	65.5	4.962	20.751	0.955	86.7	13.3	5.141	21.500
0.805	36.2	63.8	4.968	20.776	0.96	88.4	11.6	5.147	21.525
0.81	38.0	62.0	4.974	20.801	0.965	90.0	10.0	5.153	21.550
0.815	39.7	60.3	4.980	20.826	0.97	91.6	8.4	5.159	21.575
0.82	41.4	58.6	4.985	20.847	0.975	93.2	6.8	5.164	21.596
0.825	43.2	56.8	4.991	20.872	0.98	94.8	5.2	5.170	21.621
0.83	44.9	55.1	4.997	20.897	0.985	96.4	3.6	5.176	21.646
0.835	46.6	53.4	5.003	20.923	0.99	98.0	2.0	5.182	21.671
0.84	48.3	51.7	5.008	20.943	0.995	99.6	0.4	5.188	21.696
0.845	50.0	50.0	5.014	20.969	0.996	100	0	5.189	21.700
0.85	51.7	48.3	5.020	20.994					

1 kcal = 4.182 kJ.

Одним із ключових кроків методу є визначення складу суміші вуглеводів та жиру, окислених та відтворених авторами в спеціальній таблиці непротеїнових дихальних коефіцієнтів. Ця таблиця вказує на задану норму співвідношення видаленого вуглекислого газу

з організму до спожитого кисню, відсоток енергії, що отримується від вуглеводів відносно окислення жиру, та енергетичний еквівалент кисню.

Коефіцієнт дихального обміну можна сприймати як непротеїновий респіраторний коефіцієнт, припу-

скаючи, що кількість окислених білків є невеликим і незначним. Крім того, передбачається, що інші метаболічні процеси, які пов'язані з виробництвом та/або споживанням O_2 та/або виділення CO_2 (наприклад, глюконеогенез з білків, утворення кетонів, ліпогенез), є кількісно невеликим, порівняно з окисленням глюкози та жирної кислоти. Також передбачається, що коефіцієнт дихального обміну адекватно відображає респіраторний коефіцієнт: тобто на виділення вуглекислого газу, не впливають ні гіпо- ні гіпервентиляція або рівень бікарбонатного резерву.

Виходячи із методу непрямой калориметрії та особливостей математичної обробки показників вище вказаної таблиці, ми припустили наявність високого кореляційного зв'язку між респіраторним коефіцієнтом та енергетичним еквівалентом кисню, вказани-

ми авторами. Для цього ми використали статистичну програму StatSoft STATISTICA 12.5.192.7. Спочатку визначили, що обидва показники мали нормальний розподіл. Використовуючи опцію «Multiple Regression» програми, визначили високу статистичну значимість цієї моделі: $F(1,59)=2264E3$ $p<0,0001$. Так, як $p<0,0001$ (програма показує « $p < 0,0000$ »), то нульову гіпотезу про відсутність взаємного зв'язку між RQ та EEO_2 можна спростувати, тобто статистично підтвердити її наявність. Коефіцієнт детермінації моделі $R^2 = 0,999$ свідчить про дуже високий кореляційний (функціональний) зв'язок енергетичного еквівалента кисню з респіраторним коефіцієнтом, що впливає з біохімічної природи цих показників. Згідно таблиці 1, побудовано графік залежності енергетичного еквіваленту кисню від дихального коефіцієнту (рис. 1).

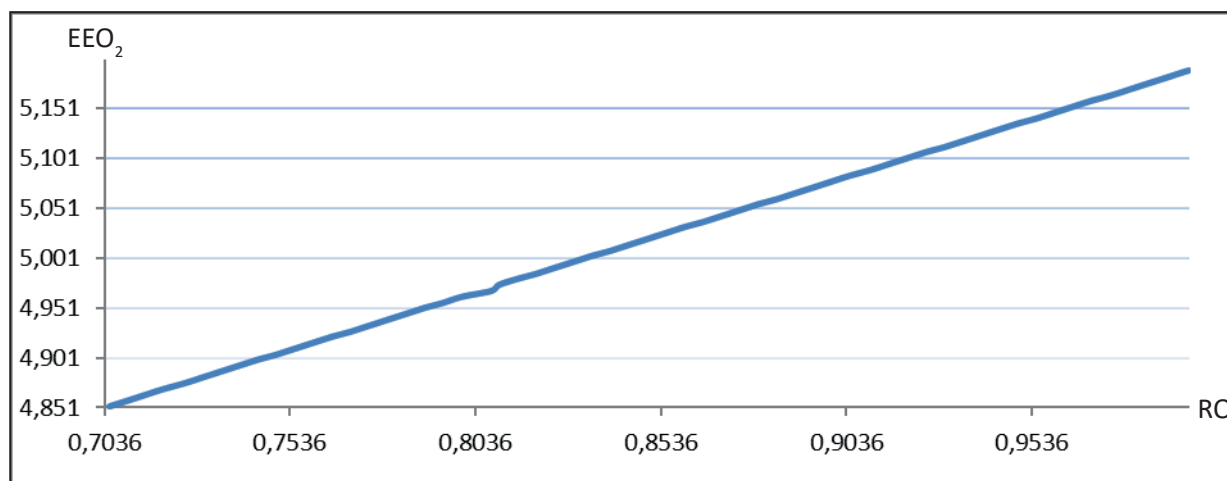


Рисунок 1. Залежність EEO_2 від RQ (по даним таблиці 1).

Відповідно, формула однофакторного лінійного регресійного аналізу ($y = b_1 \times x + b_0$) моделі має вигляд: $y = 1,156574 \times x + 4,036830$ (табл. 2). Програма також перевірила нульову гіпотезу про рівність нулю значень коефіцієнта і константи. В даному випадку значення коефіцієнтів Стюдента

дозволяють відкинути нульову гіпотезу як щодо константи, так і по відношенню до коефіцієнта регресії (представлені в графі «p-value» рівні статистичної значущості менше 0,05 як для константи, так і для коефіцієнта регресії). Таким, чином: $EEO_2 = 1,157 \times RQ + 4,037$.

Таблиця 2

Заключні статистичні показники регресійного аналізу програми

Regression Summary for Dependent Variable: параметр 2 (Лист1 in RQ_EEO)					
R= 0,99998697 R²= ,99997394 Adjusted R²= ,99997350 F(1,59)=2264E3 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,00053					
b^*	Std. Err. of b^*	B	Std. Err. of b	t(59)	p-value
		4,036830	0,000657	6145,254	0,00
0,999987	0,000665	1,156574	0,000769	1504,588	0,00

Враховуючи отриману формулу однофакторної лінійної регресії залежності EEO_2 від RQ, формулу визначення метаболізму (13) можна представити у вигляді:

$$MR = [0,863 \times V_E \times (P_E CO_2 / PaCO_2) \times (FiO_2 - FeO_2)] \times (1,157 \times RQ + 4,037) \quad (14)$$

де, RQ, згідно формул (3) та (12) буде:

$$RQ = (V_E \times F_{E\text{CO}_2}) / [0,863 \times V_E \times (P_{E\text{CO}_2} / P_{a\text{CO}_2}) \times (F_{i\text{O}_2} - F_{E\text{O}_2})] \quad (15)$$

В формулах 14 і 15, MR представлено в кал/хв., V_E – у мл/хв., $F_{E\text{CO}_2}$ – у вигляді фракції (частини) CO_2 по відношенню до загального об'єму газу, який видихається, $P_{E\text{CO}_2}$, $P_{a\text{CO}_2}$ – у мм рт.ст.

В сучасних операційних моніторах, концентрація CO_2 може бути представлена у вигляді фракції ($F_{E\text{CO}_2}$) по відношенню до загального об'єму газу, який видихається (його можна вставити в формулу 15), в%, які легко можна перевести в $F_{E\text{CO}_2}$ так і у вигляді парціального тиску (мм рт.ст.). У випадку наявності значень $P_{E\text{CO}_2}$ в мм рт.ст., для отримання $F_{E\text{CO}_2}$ треба скористатися простим розрахунком:

$$F_{E\text{CO}_2} = (P_{E\text{CO}_2}) / (P_b - 47 \text{ мм рт.ст.}) \quad (16)$$

де: P_b – барометричний тиск, який умовно можна прийняти за 760 мм рт.ст; 47 мм рт.ст. – тиск парів води при температурі 37 гр. С. (BTPS).

Для стандартизації отриманих показників, зручно використовувати рівень метаболізму, виражений на одиницю площі (м^2) пацієнта, де площа тіла розраховується по формулі Mosteller $P = \frac{\sqrt{m \times h}}{60}$ (17)

де: m – вага тіла (кг), h – зріст пацієнта (см).

Тоді, метаболізм, стандартизований на одиницю площі тіла ($\text{кал} \times \text{хв}^{-1} \times \text{м}^{-2}$) (MR_s) буде:

$$MR_s = [0,863 \times V_E \times (P_{E\text{CO}_2} / P_{a\text{CO}_2}) \times (F_{i\text{O}_2} - F_{E\text{O}_2})] \times (1,157 \times RQ + 4,037) / S \quad (18)$$

При проведенні даної методики периопераційного моніторингу використовуються наступні показники, які контролюються сучасним монітором наркозно-дихального апарата:

V_E – вентиляція легень за хвилину (мл/хв);

$P_{E\text{CO}_2}$ ($F_{E\text{CO}_2}$) – відповідно, парціальний тиск (мм рт.ст.) та фракція (в одиницях) CO_2 в газі, який видихається;

$F_{i\text{O}_2}$ та $F_{E\text{O}_2}$ – фракція O_2 в газовій суміші, яка вдихається та видихається в одиницях (%/100);

А, також, лабораторним газоаналізатором визначається парціальний тиск вуглекислого газу в артеріальній крові ($P_{a\text{CO}_2}$), взятій з променевої артерії (мм рт.ст.) та вводяться вага (m , кг) та зріст (h , см) пацієнта.

Мініінвазивна технологія енергомоніторингу (без катетеризації променевої артерії та визначення $P_{a\text{CO}_2}$), проводиться у пацієнтів без порушень вентиляції та перфузії, коли альвеолярний мертвий простір зазвичай незначний а, отже, анатомічний та, відповідно, фізіологічний мертвий простір, оцінюється в 2 мл/кг ваги тіла (Hough A. 2001).

Тоді, враховуючи, що $Valv = V_E - (2 \times m \times RR)$,

де RR – частота дихання (хв^{-1}), формула розрахунку метаболізму виглядає наступним чином:

$$MR_s = [V_E - (2 \times m \times RR)] \times (F_{i\text{O}_2} - F_{E\text{O}_2}) \times (1,157 \times RQ + 4,037) / S \quad (19)$$

Значення метаболізму, які отримуються під час периопераційного енергомоніторингу, порівнюють з вихідними показниками, які були перед оперативним втручанням та рівнем основного обміну (базальним метаболізмом, *Basal Metabolic Rate*, BMR) будуючи периопераційну інтенсивну терапію, яка буде запобігати розвитку енергокисневого дефіциту, отже знижуватиме ризики ускладнень, пов'язані з ним.

BMR – це та необхідна кількість енергії, яка повинна підтримувати не активні на даний момент тканини організму для збереження їх можливості до негайного та не обмеженого функціонування. Він розраховується як необхідна кількість кілокалорій на добу для кожної конкретної людини, як рівень належного індивідуального метаболізму в стані фізіологічного спокою та нормальної температури тіла, тобто, як та кількість енергії, яка необхідна для підтримки самих основних функцій організму в стані спокою, в не стресовому навколишньому середовищі, без урахування енергії, яка витрачається на рухову активність, перетравлення їжі, хірургічну та анестезіологічну агресію, тощо [7]. BMR розраховується згідно з формули Міффіна – Сан Джеора, та представляє узагальнення статистичних даних авторів. В своїй роботі, ми використовуємо спрощений варіант базального метаболізму, без використання коефіцієнту фізичної активності людини, з урахуванням статі, ваги, зросту та віку в ккал/24год. Тоді, з урахуванням переходу на $\text{кал} \times \text{хв}^{-1}$ та стандартизації показників на одиницю площі тіла визначення базального метаболізму в $\text{кал} \times \text{хв}^{-1} \times \text{м}^{-2}$:

$$BMR_{s(\text{чоловіка})} = 0,694 \times [10 \times m(\text{кг}) + 6,25 \times h(\text{см}) - 5 \times \text{вік(роки)} + 5] / S; \quad (20)$$

$$BMR_{s(\text{жінки})} = 0,694 \times [10 \times m(\text{кг}) + 6,25 \times h(\text{см}) - 5 \times \text{вік(роки)} - 161] / S; \quad (20)$$

Спосіб периопераційного енергомоніторингу реалізований у вигляді конкретної комп'ютерної програми, що дозволяє досить швидко виконувати всі розрахунки, пов'язані з її використанням у реальному часі.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Спосіб був апробований на 125 пацієнтах нашої клініки, яким проводилися різні оперативні втручання. Нижче ми приводимо приклади такого використання під час оперативних втручань у пацієнтів, під загальним знеболюванням з використанням інгаляційного анестетика севофлюрану та наркотично-

го анальгетика фентаніла в умовах низько-поточної штучної вентиляції легень наркозно-дихальним апаратом «Fabius Tiro» та використання біомонітора «Infinity Delta» («Dräger», Germany). Премедикація безпосередньо перед операцією – внутрішньовенно атропіну сульфат (0,01 мг/кг) та фентаніл 0,005% (0,1 мг). Індукція наркозу проводилася пропофолом (2,0 мг/кг). Відразу після індукції протягом 30 хв внутрішньовенно крапельно здійснювали інфузію розчину парацетамолу 1000 мг (інфулган, «Юрія-Фарм», Україна). Основним анестетиком був севофлюран. Фентаніл 0,005% вводили в дозі (2-5) $\text{мкг} \times \text{кг}^{-1} \times \text{год}^{-1}$ за допомогою шприцевого інфузійного насосу фірми B|Braun Space. В якості м'язового релаксantu використовували атракуріуму бесилат (Атракуріум-Ново, «Новофарм-Біосинтез», Україна) в загальноприйнятих дозах. З метою запобігання нудоти та блювоти в ранньому післяопераційному періоді, перед оперативним втручанням призначали селективний антагоніст 5НТз серотонінових рецепторів ондансетрон в загальній дозі 8 мг. За 30 хв. до пробудження вводився декскетпрофен (дексалгін, Berlin-Chemie Germany) в дозі 50 мг і надалі по 50 мг через 8-12 год. Під час наркозу застосовували всі «Міжнародні стандарти безпечної анестезіологічної практики» WFSA 2010 [3]. Глибина наркозу контролювалась показниками електричної активності головного мозку за допомогою спеціального біспектрального модуля монітору Infinity Delta з визначенням BIS-індексу, який підтримувався на рівні 45-50 балів. Функціональний стан серця та гемодинамічні показники визначалися в режимі реального часу біомонітором «Infynity Delta» («Dräger», Germany) та реокардіогра-

фічним комплексом «Реоспектр-3» (Україна, Росія, 2013) методом інтегральної реовазографії по Тищенко. При проведенні метаболічного моніторингу використовувалися наступні показники:

Вага (кг) та зріст пацієнта (см).

V_E – загальна хвилинна вентиляція (мл/хв);

$P_E \text{CO}_2$ ($F_E \text{CO}_2$) – відповідно, парціальний тиск (мм рт.ст.) та фракція (в одиницях) CO_2 в газі, який видихається;

$F_i \text{O}_2$ та $F_E \text{O}_2$ – фракція O_2 в газовій суміші, яка вдихається та видихається в одиницях (%/100);

У випадку використання мініінвазивної технології (без катетеризації променевої артерії) розрахунок проводився згідно формули (19). При катетеризації артерії, додатково визначалися PaCO_2 , використовуючи аналізатор газового, кислото-лужного та електrolітного складу «Cobas b 221» (Roche Diagnostics GmbH, Germany) та розрахунки проводили згідно формули (18).

В таблицях отриманих даних (табл. 3, табл. 4) представлені: середній артеріальний тиск (Mean Blood Pressure, MBP), частота серцевих скорочень (Heart Rate, HR), ударний об'єм (Stroke Volume, SV), ударний індекс (Stroke Volume Index, SVI), серцевий викид (Cardiac Output, CO), серцевий індекс (Cardiac index, CI), транспорт кисню (Oxygen Delivery, DO_2), споживання кисню (VO_2), респіраторний коефіцієнт (RQ), енергетичний еквівалент кисню (EEO_2), рівні реального MR_s та базального BMR_s метаболізму, стандартизовані на одиницю площі тіла.

Таблиця 3

Показники енергомоніторингу пацієнта з морбідним ожирінням 4ст.

Показники / етапи дослідження	1	2	3	4	5	6	7
MBP (мм рт.ст.)	106	99	85	74	84	92	96
HR (хв ⁻¹)	71	65	81	84	73	74	69
SV (мл×хв ⁻¹)	72	75	47	42	63	69	78
SVI (мл×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	27	28	17	16	23	26	29
CO (л×хв ⁻¹)	5,1	4,9	3,8	3,5	4,6	5,1	5,4
CI (л×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	1,9	1,8	1,4	1,3	1,7	1,9	2,0
DO_2 (мл×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	396	375	292	271	355	396	417
VO_2 (мл×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	148	135	129	118	127	139	145
RQ (ум.од.)	0,83	0,83	0,80	0,78	0,72	0,75	0,81
EEO_2 (кал/мл)	5,0	5,0	4,96	4,94	4,87	4,90	4,97
MR_s (кал×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	740	675	640	583	619	681	721
BMR_s (кал×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	616						

Таблиця 4

Показники енергомоніторингу пацієнта з дифузним зобом Іст., тиреотоксикозом тяжкої форми у стадії нестійкої медсубкомпенсації

Показники / етапи дослідження	1	2	3	4	5	6	7
MBP (мм рт.ст.)	121	113	130	129	104	88	81
HR (хв ⁻¹)	79	81	95	86	76	72	64
SV (мл×хв ⁻¹)	82	76	84	79	76	64	67
SVI (мл×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	51	48	56	49	48	40	42
CO (л×хв ⁻¹)	6,5	6,2	7,9	6,8	5,8	4,6	4,3
CI (л×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	4,1	3,9	4,9	4,3	3,6	2,9	2,7
DO ₂ (мл×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	787	748	940	825	690	556	518
VO ₂ (мл×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	164	159	175	187	169	157	153
RQ (ум.од.)	0,86	0,84	0,89	0,88	0,85	0,83	0,83
ЕЕО ₂ (кал/мл)	5,0	5,0	5,1	5,1	5,0	5,0	5,0
MR _s (кал×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	820	795	893	954	845	785	765
BMR _s (кал×хв ⁻¹ ×м ⁻²)	533						

Приклад 1. Пацієнт П. 56 років. Діагноз: Морбідне ожиріння 4ст. Вага тіла – 160кг, зріст 172 см, Індекс маси тіла (*Body Mass Index, BMS*) – 54. Площа тіла – 2,7м². Гемоглобін крові – 150 г/л. BMR_s – 616 кал×хв⁻¹×м⁻². Операція: лапароскопічна рукавна резекція шлунку (*sleeve gastrectomy*). Ступінь передопераційного ризику пацієнта за класифікацією фізичного стану американського товариства анестезіологів – ASA III. Тривалість загального знеболення – 4 години. Етапи дослідження: вихідні дані перед операцією (1-й етап), індукція в наркоз (2-й), положення зворотне Тренделенбургу (3-й), на момент накладання карбоксиперитонеуму (4-й), травматичний основний етап операції (5-й), кінець операції (6-й), пробудження та транспортування в палату (7-й етап). Показники енергомоніторингу пацієнта представлені в таблиці 3. Як видно з таблиці, вихідний метаболізм пацієнта складав 740 кал×хв⁻¹×м⁻², що на 20% перевищував його базальний рівень та давав відповідний запас «міцності» енергетичним процесам під час проведення анестезіологічного забезпечення оперативного втручання. Показники гемодинаміки були стабільні. Під час зміни положення тіла на зворотне Тренделенбурга та на момент накладання карбоксиперитонеуму, спостерігалось зниження метаболізму, відповідно, на 100 та 157 кал×хв⁻¹×м⁻², що на 13,5% та 21,2% було нижче вихідних значень. При цьому, метаболізм при зміні положення наблизився до базального рівня (640 кал×хв⁻¹×м⁻²), а під час накладання карбоксиперитонеуму став нижчим за нього на 5,4% та набув значення 583 кал×хв⁻¹×м⁻². Це було розцінено як результат гемодинамічних порушень та, відповідно, транспорту кисню, внаслідок зменшення венозного повернення крові за рахунок позиційних змін тіла пацієнта та карбоксиперитонеуму. Корекція проводилась посиленою в/в інфузією збалансованих

солевих розчинів (Хартмана, Рінгера_Лактата) та поступовою зміною положення тіла пацієнта і повільним досягненням необхідного внутрішньочеревного тиску. Надалі, для досягнення більш надійних показників гемодинаміки, враховуючи прогресуюче зниження метаболізму до базального рівня, додатково, протягом 40 хвилин вводився дозовано норадреналін в дозі 0,04 мкг×кг⁻¹×хв⁻¹. На травматичному етапі оперативного втручання намітилась деяка тенденція відновлення метаболізму, проте він ще лишався практично на рівні базального (619 кал×хв⁻¹×м⁻²). Доза норадреналіна була підвищена до рівня 0,06 мкг×кг⁻¹×хв⁻¹ та незабаром, після досягнення метаболізму 670 кал×хв⁻¹×м⁻², що майже на 10% перевищував базальний рівень, від був відмінений. З моменту травматичного етапу оперативного втручання та до його закінчення, спостерігалось досить повільне зростання рівня метаболізму, при достатньо низькому рівні дихального коефіцієнта (0,72-0,75). Це, ймовірно, могло бути проявами порушення метаболізму внаслідок можливого непродуктивного використання жирних кислот з утворенням кетонових тіл, при збереженні відповідного споживання кисню але зі зменшенням виділення вуглекислого газу, тому що цей процес проходить без утворення СО₂. Тому, по закінченню оперативного втручання та відновлення горизонтального положення пацієнта на операційному столі, протягом 40 хвилин продовжувалися підтримка медикаментозного сну, штучна вентиляція легень в режимі нормовентиляції з поступовим зменшенням FiO₂ до фізіологічного рівня складу повітря та досягнення метаболізму майже вихідних значень (721 кал×хв⁻¹×м⁻²). Після чого пацієнт швидко прокинувся, відновилися м'язовий тонус, адекватне спонтанне дихання, ясна свідомість. Температура тіла – 36,4 гр. С. Проведена екстубація трахеї та транспортування в звичайну палату. Надалі

пацієнт не потребував інтенсивної (респіраторної, гемодинамічної, іншої) терапії. Когнітивні порушення не відмічалися. З метою знеболювання отримував нестероїдні протизапальні засоби та парацетамол. Наркотичних засобів не потребував. Був достатньо активним. Через 12 годин міг вставати, рухатись по палаті.

Приклад 2. Пацієнтка А. 45 років. Діагноз: Дифузний зоб II ст., тиреотоксикоз тяжкої форми у стадії медсубкомпенсації. Вага тіла – 56 кг, зріст 169 см, Індекс маси тіла (*Body Mass Index, BMI*) – 20. Площа тіла – 1,6 м². Гемоглобін крові – 138 г/л. $BMR_s = 618 \text{ кал} \times \text{хв}^{-1} \times \text{м}^{-2}$. Операція: Тиреоїдектомія. Ступінь передопераційного ризику пацієнта – ASA IV. Тривалість загального знеболення – 2 години. Етапи дослідження: вихідні дані перед операцією (1-й етап), індукція в наркоз (2-й), мобілізація щитовидної залози (3-й), видалення щитовидної залози (4-й), ушивання післяопераційної рани (5-й), кінець операції (6-й), пробудження та транспортування в палату (7-й етап). Показники енергомоніторингу пацієнта представлені в таблиці 4. Як видно з таблиці, вихідне значення метаболізму складало $820 \text{ кал} \times \text{хв}^{-1} \times \text{м}^{-2}$, що на 54% перевищувало його базальний рівень. А, отже, у хворої були прояви гіперметаболізму внаслідок не стійкої медикаментозної субкомпенсації тиреотоксикозу, не зважаючи на попередній прийом дексаметазону та тирозолу. Клінічними проявами гіперметаболізму був гіпердинамічний синдром з проявами синусової тахікардії (79 уд./хв.) артеріальною гіпертензією (МВР – 121 мм рт.ст.) підвищеними цифрами серцевого індексу ($4,1 \text{ л} \times \text{хв}^{-1} \times \text{м}^{-2}$). Хворій додатково перед оперативним втручання внутрішньовенно введено дексаметазон 8мг, гідрокортизон (солукортеф) 100мг. Далі, після введення навантажувальної дози есмолола гідрохлорида (500 мкг \times кг \times хв. протягом 1 хвилини), розпочали його введення зі швидкістю 25-50 мкг \times кг \times хв. під контролем ЕКГ, показників гемодинаміки та рівня метаболізму. На етапах мобілізації, видалення щитовидної залози та початку ушивання післяопераційної рани, температура хворої підвищувалася до 37,6 гр. С. При цьому, прояви гіперметаболізму були найбільш значні (відповідно 893, 954 та 845 $\text{кал} \times \text{хв}^{-1} \times \text{м}^{-2}$), що потребувало підвищення дози введення есмолола гідрохлорида до 100 мкг \times кг \times хв. та додаткового введення 100 мг гідрокортизону. На кінець оперативного втручання та пробудження, метаболізм нормалізувався, проявів гіпердинамії та гіпертермії не було. Хвора в стабільному стані переведена в палату. Післяопераційний перебіг без особливостей.

ВИСНОВКИ

1. Метод периопераційного енергомоніторингу істотно доповнює «Міжнародні стандарти безпечної анестезіологічної практики», WFSA (2010), підвищує периопераційну безпеку пацієнтів за рахунок виявлення порушень метаболізму та проведення відповідної патогенетичної корекції.

2. Розроблена універсальна формула визначення рівня метаболізму хворого у вигляді: $MR = [0,863 \times V_E \times (P_E CO_2 / PaCO_2) \times (FiO_2 - FeO_2) \times EEO_2]$. Для визначення енергетичного еквівалента кисню формули нашої моделі енергомоніторингу, за допомогою однофакторного лінійного регресійного аналізу, отримано рівняння регресії: $EEO_2 = 1,157 \times RQ + 4,037$.

3. Метод реалізується за допомогою комп'ютерної програми, створеної на основі розробленої універсальної формули. Вхідні дані традиційні для практичної анестезіології: вага (кг) та зріст пацієнта (см); V_E – загальна хвилинна вентиляція (мл/хв); $P_E CO_2$ ($F_E CO_2$) – відповідно, парціальний тиск (мм рт. ст.) та фракція (в одиницях) CO_2 в газі, який видихається; FiO_2 та $F_E O_2$ – фракція O_2 в газовій суміші, яка вдихається та видихається в одиницях (%/100); при катетеризації артерії, додатково визначається $PaCO_2$.

Перспективи подальших досліджень. Необхідне подальше проведення досліджень рівня метаболізму, методів його корекції у пацієнтів з різноманітною хірургічною патологією, при різних хірургічних технологіях, детальне вивчення предиктивного його значення у периопераційному перебігу, розвитку інтра- та післяопераційних ускладнень.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Інформація про фінансування. Робота виконана за рахунок державного фінансування в рамках НДР.

Дотримання етичних норм. Автори дотримуються принципів, що містяться у Гельсінкській декларації, а також в Міждисциплінарних принципах і керівних вказівках щодо використання тварин у дослідженнях, тестуванні та освіті, опублікованих Спеціальним комітетом з досліджень на тваринах при Нью-Йоркській академії наук. Робота з хворими людьми підготовлена та проведена відповідно з принципами етики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Thorell A., Mac Cormick A. D., Awad S., et al. Guidelines for Perioperative Care in Bariatric Surgery: Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) Society Recommendations. *World J. Surg.* 2016. Vol. 40 (9). P. 2065-2083. <https://doi.org/10.1007/s00268-016-3492-3>.

2. Стаховський О. Е. Мультиmodalна програма швидкого відновлення хворих на рак сечового міхура після радикальної цистектомії з ілеостомією. Урологія. 2019. Т 23. № 1. С. 53-59. <https://doi.org/10.26641/2307-5279.23.1.2019.161664>.
3. Merry A., Cooper J., Soyannwo O., et al. International Standards for a Safe Practice of Anesthesia 2010. Can. J. Anaesth. 2010. Vol. 57 (11). P. 1027-1034. <https://doi.org/10.1007/s12630-010-9381-6>.
4. Tusman G., Sipmann F. S., Bohm S. H. Rationale of Dead Space Measurement by Volumetric Capnography. Anesth. Analg. 2012. Vol. 114 (4). P. 866-874. PMID: 22383673. <https://doi.org/10.1213/ANE.0b013e318247f6cc>.
5. Lusk. G. Animal calorimetry. Analysis of the oxidation of mixtures of carbohydrate and fat. A correction. J. Biol. Chem. 1924. Vol. 59. P. 41-42.
6. Peronnet F., Massicotte D. Table of Nonprotein Respiratory Quotient: An Update. Can. J. Spt. Sci. 1991. Vol.16 (1). P. 23-29.
7. Frankenfield D., Roth-Yousey L., Compher. C. Comparison of predictive equations for resting metabolic rate in healthy, nonobese and obese adults: A systematic review. Journal of the American Dietetic Association. 2005. Vol. 105 (5). P. 775-789. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2005.02.005>. PMID15883556.

REFERENCES

1. Thorell A., Mac Cormick A. D., Awad S., et al. (2016). Guidelines for Perioperative Care in Bariatric Surgery: Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) Society Recommendations. World J. Surg., 40 (9), 2065-2083. <https://doi.org/10.1007/s00268-016-3492-3>.
2. Stakhovskyi O. E. (2019). Multymodalna prohrama shvydkoho vidnovlennia khvorykh na rak sechovoho mikhura pislia radykalnoi tsystektomii z ileostomyeoneoplastykoii. Urolohiia, 23 (1), 53-59. <https://doi.org/10.26641/2307-5279.23.1.2019.161664>.
3. Merry A., Cooper J., Soyannwo O., et al. (2010). International Standards for a Safe Practice of Anesthesia 2010. Can. J. Anaesth., 57 (11), 1027-1034. <https://doi.org/10.1007/s12630-010-9381-6>.
4. Tusman G., Sipmann F. S., Bohm S. H. (2012). Rationale of Dead Space Measurement by Volumetric Capnography. Anesth. Analg., 114, 866-874. PMID: 22383673. <https://doi.org/10.1213/ANE.0b013e318247f6cc>.
5. Lusk. G. (1924). Animal calorimetry. Analysis of the oxidation of mixtures of carbohydrate and fat. A correction. J. Biol. Chem., 59, 41-42.
6. Peronnet F., Massicotte D. (1991). Table of Nonprotein Respiratory Quotient: An Update. Can. J. Spt. Sci., 16(1), 23-29.
7. Frankenfield D., Roth-Yousey L., Compher. C. (2005). Comparison of predictive equations for resting metabolic rate in healthy, nonobese and obese adults: A systematic review. Journal of the American Dietetic Association, 105 (5), 775-789. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2005.02.005>. PMID15883556.

*Резюме***СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕПРЯМОЙ КАЛОРИМЕТРИИ ПРИ ПЕРИОПЕРАЦИОННОМ ЭНЕРГОМОНИТОРИНГЕ****В. И. Черний, А. И. Денисенко**

Государственное научное учреждение « Научно-практический центр профилактической и клинической медицины»
Государственного управления делами, Киев, Украина

Цель исследования – разработать способ периоперационного энергомониторинга и внедрить его в клиническую практику.

Материал и методы. Для исследования были привлечены 125 пациентов, которым проводились различные оперативные вмешательства под общим обезболиванием с использованием ингаляционного анестетика севофлюрана и наркотического анальгетика фентанила в условиях низко-поточной искусственной вентиляции легких. Методы периоперационного мониторинга «Международные стандарты безопасной анестезиологической практике» WFSA (World Federation Of Societies of Anaesthesiologists, 2010) были дополнены использованием непрямой калориметрии.

Результаты. Проанализировав литературные данные, была выявлена тесная корреляционная связь между энергетическим эквивалентом кислорода (EEO_2) и респираторным коэффициентом (RQ). Авторы получили соответствующую формулу однофакторной линейной регрессии, которая имела вид: $EEO_2 = 1,157 \times RQ + 4,037$. Используя основные принципы газообмена в легких Бора-Энгоффа, был разработан метод периоперационного энергомониторинга, на основе непрямой калориметрии с учетом реальных значений энергетического эквивалента кислорода пациентов. Разработана универсальная формула определения уровня метаболизма больного (MR, кал / мин) в виде:

$$MR = [0,863 \times VE \times (PECO_2 / PaCO_2) \times (FiO_2 - FE_{O_2})] (1,157 \times RQ + 4,037)$$

где, VE – общая вентиляция легких в минуту (мл / мин), $PECO_2$, $PaCO_2$ – парциальное давление соответственно в смеси газов, которая выдыхается и в артериальной крови (мм рт.ст.). FiO_2 и FE_{O_2} – фракция кислорода в газовой смеси, которая вдыхается и выдыхается в единицах (%/100). Метод реализован в виде компьютерной программы, созданной на основе разработанной формулы. В работе представлены методы интенсивной периоперационной терапии с учетом уровня метаболизма.

Вывод. Метод периоперационного энергомониторинга существенно дополняет «Международные стандарты безопасной анестезиологической практике», WFSA (2010) повышает периоперационную безопасность пациентов за счет выявления нарушений метаболизма и проведения соответствующей патогенетической коррекции.

Ключевые слова: периоперационный энергомониторинг, потребление кислорода, энергетический (калорийный) эквивалент кислорода, уровень метаболизма.

Summary

CURRENT POSSIBILITIES OF USE OF INDIRECT CALORIMETRY IN PERIOPERATIVE ENERGY MONITORING

V. I. Cherniy, A. I. Denysenko

State Institution of Science "Research and Practical Centre of Preventive and Clinical Medicine" State Administrative Department, Kyiv, Ukraine

The purpose of the study is to develop a method of perioperative energy monitoring and to implement it in clinical practice.

Material and methods. The study involved 125 patients who underwent various surgical interventions under general anesthesia using sevoflurane (inhalation anesthetics) and fentanyl (narcotic analgesics) in low-flow artificial lung ventilation. Methods of perioperative monitoring (International Standards for a Safe Practice of Anesthesia 2010, WFSA) were supplemented using indirect calorimetry.

Results. Analyzing the literature data, a close correlation was found between the energy equivalent of oxygen (EEE2) and the respiratory factor (RQ). The authors obtained the corresponding one-factor linear regression formula, which had the form: $EEE2 = 1.157 \times RQ + 4.037$. Using the basic principles of gas exchange in the lungs of Bohr-Engoff, a method of perioperative energy monitoring was developed, based on indirect calorimetry, taking into account the real values of the energy equivalent of patients' oxygen. The universal formula for determining the level of metabolism of the patient (MR, cal / min) in the form of:

$$MR = [0.863 \times VE \times (PECO_2 / PaCO_2) \times (FiO_2 - FeO_2)] (1.157 \times RQ + 4.037)$$

where, VE – total ventilation of the lungs per minute (ml / min), PECO₂, PaCO₂ – partial pressure, respectively, in a mixture of gases, which is exhaled and in the arterial blood (mm Hg). FiO₂ and FeO₂ are the oxygen fraction in the gas mixture that is inhaled and exhaled in units (% / 100). The method is implemented as a computer program created on the basis of the developed formula. The methods of intensive perioperative therapy taking into account the level of metabolism are presented.

Conclusion. The method of perioperative energy monitoring substantially complements the "International Standards for Safe Anesthesiology Practice", WFSA (2010) enhances the perioperative safety of patients by detecting metabolic disorders and conducting appropriate pathogenetic correction.

Keywords: perioperative energy monitoring, oxygen consumption, energy (calorie) oxygen equivalent, metabolism level.

Інформація про авторів знаходиться на сайті <http://www.cp-medical.com>.

Дата надходження до редакції – 12.12.2019